TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Terças e Quintas de 8:00 às 10:00 hs

prof. Tania S. Klein
tania@eq.ufrj.br
Lab CFD

Aula 22

- Radiação: Processos e Propriedades
  - Introdução
  - Propriedades da Radiação
  - Intensidade da Radiação
  - Corpo Negro

2

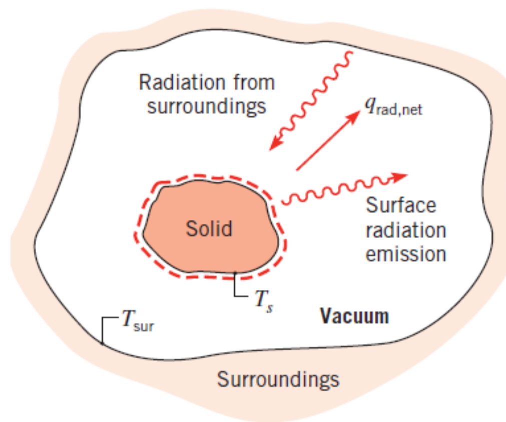
Introdução

Diferentemente da condução e convecção, a radiação não necessita de meio/matéria para ser transmitida, pelo contrário, é mais eficiente no vácuo.

Ela é relevante em muitos processos industriais, como aquecimento, resfriamento, secagem, radiação solar e combustão de combustível fóssil.

Associamos a radiação térmica com a taxa na qual a energia é emitida pelo meio como um resultado de sua temperatura finita.

No vácuo, a transferência de calor de/para um objeto a T_s para/de sua vizinhança a $T_{viz} \neq T_s$ é dada exclusivamente por radiação.



Introdução

Todos os tipos de matéria emitem radiação.

Gases e sólidos semitransparentes (vidros e cristais) → a radiação é um fenômeno volumétrico;

Líquidos e sólidos → a radiação é um fenômeno de superfície

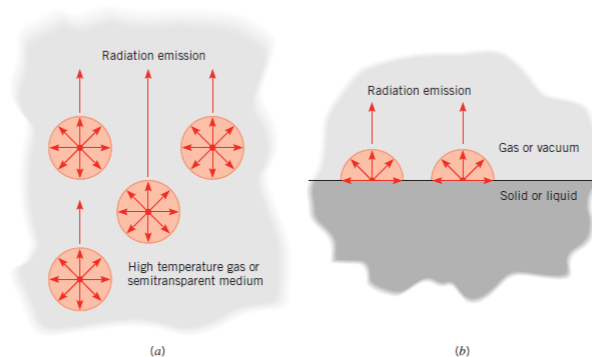


FIGURE 12.2 The emission process. (a) As a volumetric phenomenon. (b) As a surface phenomenon.

4

Introdução

O mecanismo de emissão está relacionado às oscilações ou transições dos muitos elétrons que constituem a matéria. As oscilações são funções da energia interna e, consequentemente, da temperatura da matéria. Associa-se então a emissão de radiação térmica com condições termicamente excitadas no interior da matéria.

A natureza do transporte de calor por radiação pode ser explicada por duas teorias:

- Propagação de uma coleção de partículas chamadas fótons ou quanta.
- Propagação de ondas eletromagnéticas

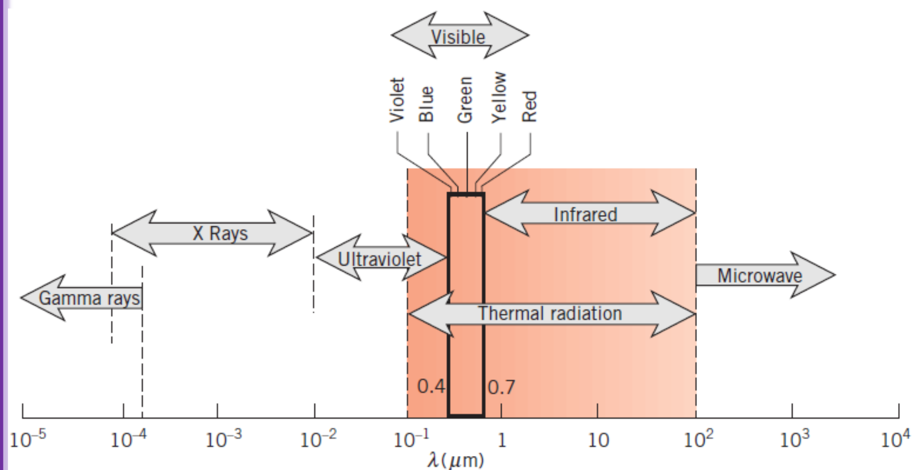
Em qualquer caso, a radiação está ligada às propriedades de ondas, em que vale a relação:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

λ → comprimento de onda
c → velocidade da luz no meio. No vácuo: $2{,}998 \times 10^{8}$m/s
υ → frequência

Introdução

Espectro Eletromagnético

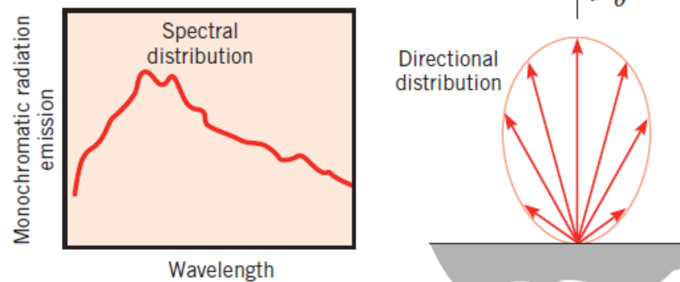


A radiação térmica vai de 0,1 a 100µ e inclui uma porção do UV e toda luz visível e infravermelha.

Introdução

A magnitude da radiação varia com λ e o termo distribuição espectral é usado pra se referir à natureza desta dependência. A distribuição espectral, bem como a intensidade da radiação em qualquer comprimento de onda, varia com a natureza e a temperatura da superfície emissora.

Uma superfície pode emitir preferencialmente em certas direções, criando uma distribuição direcional da radiação emitida. O tratamento quantitativo apropriado da transferência de calor radiante é função dos efeitos espectrais e direcionais da radiação.

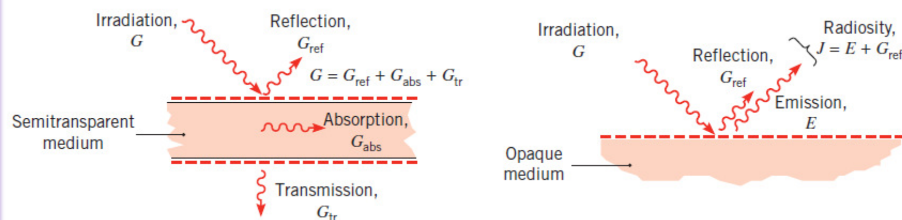


Propriedades da Radiação

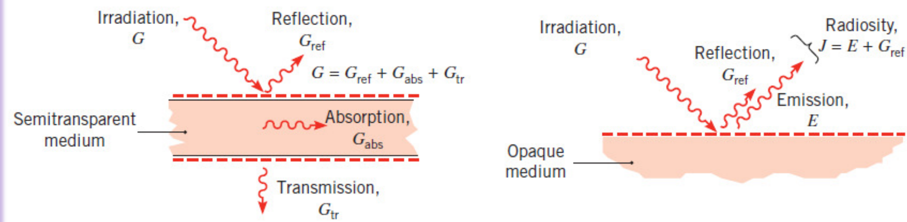
Define-se por Irradiação G a radiação incidente total (taxa) em uma superfície, por unidade de área (fluxo), sobre todos os comprimentos de onda e todas as direções. Esta pode ser proveniente do em torno, que pode consistir em várias superfícies a várias temperaturas diferentes, e/ou pela irradiação solar ou de um laser ou outra fonte emissora qualquer.

Essa radiação incidente G, pode ser absorvida, refletida e/ou transmitida (atravessa a superfície). Num meio opaco, não há transmissão, apenas absorção e reflexão.

Lembrando que toda superfície emite radiação, ou seja, tem um pode emissivo E: radiação emitida por unidade de área (fluxo).



Propriedades da Radiação



α → fração da radiação incidente absorvida ou absortividade total ou absortância
ρ → fração da energia incidente refletida ou refletividade total ou refletância
τ → fração da energia incidente transmitida ou transmissividade total ou transmitância

Corpo transparente → parte da radiação que ultrapassa sua superfície, atravessa-o sem sofrer interferência em sua natureza;

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

Corpo opaco → toda a radiação que ultrapassa sua superfície é absorvida em seu interior.

$$\rho + \alpha = 1$$

Propriedades da Radiação

Define-se por Radiosidade J a taxa de energia por radiação total que é emitida por uma superfície (por unidade de área; J é fluxo!). Assim, para meios opacos:

$$J = E + \rho G$$

Define-se por taxa líquida de transferência de calor por radiação, por unidade de área, a partir de uma superfície:

$$q''_{rad} = J - G$$

De modo que, para uma superfície opaca:

$$q''_{rad} = E + \rho G - G = \varepsilon \sigma T_s^4 - \alpha G$$

Intensidade da Radiação

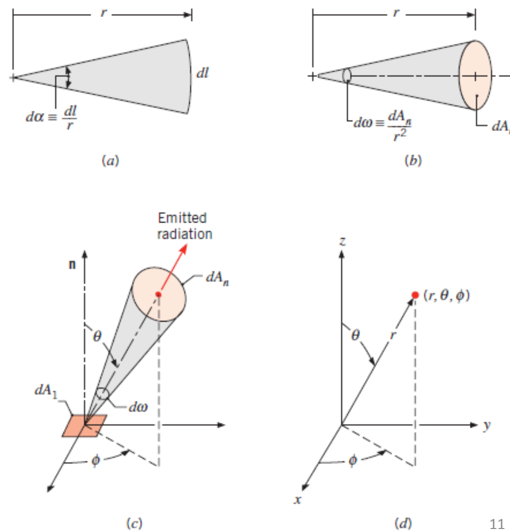
Definições espaciais relacionas a direção de propagação da radiação:

(a) Ângulo plano

(b) Ângulo sólido

(c) Emissão de radiação de uma área diferencial dA_1 no interior de um ângulo sólido dω subentendido por dA_n em um ponto sobre dA_1

(d) Sistema de coordenadas esféricas



11

Intensidade da Radiação

Definições espaciais relacionas a direção de propagação da radiação

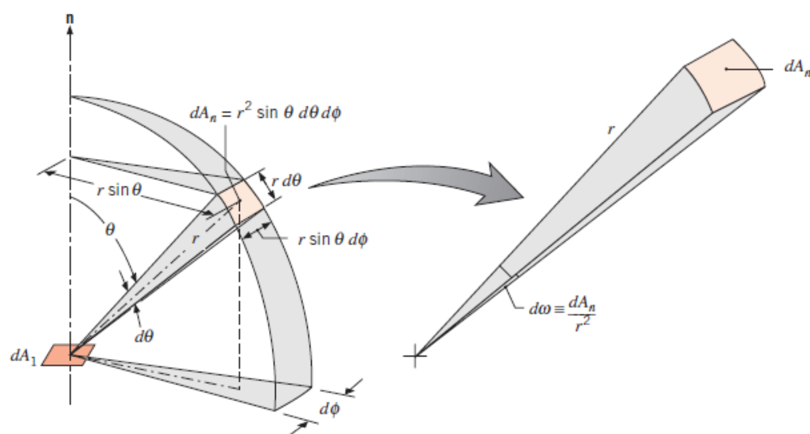


FIGURE 12.7 The solid angle subtended by dA_n at a point on dA_1 in the spherical coordinate system.

Intensidade da Radiação

Definição:

A intensidade espectral da radiação emitida, $I_{\lambda,e}$, é a taxa na qual a energia radiante é emitida a um comprimento de onda λ na direção (θ,Φ), por unidade de área da superfície emissora normal a essa direção, por unidade de ângulo sólido em torno dessa direção e por unidade do intervalo de comprimento de onda dλ em torno de λ:

$$I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \equiv \frac{dq}{dA_1 \cos\theta \cdot d\omega \cdot d\lambda}$$

$dq/d\lambda \equiv dq_\lambda$ é taxa na qual a radiação de comprimento de onda λ deixa dA_1 e passa através de dA_n:

$$dq_\lambda = I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) dA_1 \cos\theta \, d\omega$$

dq_λ por unidade de área da superfície emissora resulta no fluxo de radiação espectral associado com dA_1:

$$dq''_\lambda = I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi$$

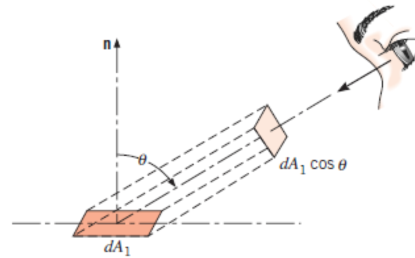


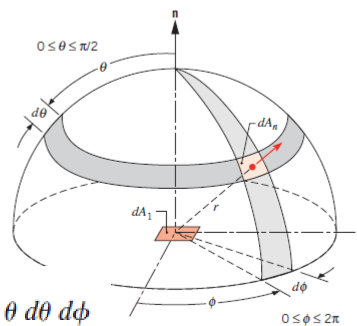
FIGURE 12.8 The projection of dA_1 normal to the direction of radiation.

13

Intensidade da Radiação

Definição:

O poder emissivo (hemisférico) espectral E_λ é definido como a taxa na qual a radiação de comprimento de onda λ é emitida em todas as direções a partir de uma superfície por unidade de comprimento de onda dλ em torno de λ e por unidade de área de superfície:



$$E_\lambda(\lambda) = q''_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi$$

O poder emissivo (hemisférico) total E é então a taxa na qual a radiação é emitida por unidade de área (fluxo) em todos os possíveis comprimentos de onda e em todas as direções possíveis:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) \, d\lambda \longrightarrow E = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi \, d\lambda$$

14

Intensidade da Radiação

Definição:

Um caso especial que fornece uma aproximação razoável para muitas superfícies é o emissor difusivo: uma superfície cuja intensidade da radiação emitida independe da direção, ou seja, , $I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\Phi) = I_{\lambda,e}(\lambda)$. Nesse caso,

$$E_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi)\cos\theta\sin\theta\, d\theta\, d\phi = \pi I_{\lambda,e}(\lambda)$$

$$E = \int_0^\infty E_\lambda(\lambda)\, d\lambda \longrightarrow E = \pi I_e$$

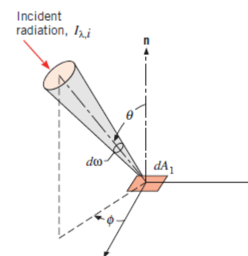
Intensidade total da radiação emitida

15

Intensidade da Radiação

Definição:

A irradiação espectral G_λ é a taxa na qual a radiação de comprimento de onda λ é incidente em uma superfície, por unidade de área da superfície e por uidade do intervalo de comprimento de onda dλ em torno de λ:



$$G_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)\cos\theta\sin\theta\, d\theta\, d\phi$$

A irradiação total G é a taxa na qual a radiação é incidente por unidade de área a partir de todas as direções e todos os comprimentos de onda:

$$G = \int_0^\infty G_\lambda(\lambda)\, d\lambda \longrightarrow G = \int_0^\infty\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)\cos\theta\sin\theta\, d\theta\, d\phi\, d\lambda$$

Se a radiação incidente for difusa:

Intensidade total de irradiação

$$G_\lambda(\lambda) = \pi I_{\lambda,i}(\lambda) \longrightarrow G = \pi I_i$$

16

Intensidade da Radiação

Definição:

A radiosidade espectral J_λ é a taxa na qual a radiação de comprimento de onda λ deixa a área unitária da superfície, por unidade do intervalo de comprimento de onda dλ em torno de λ:

$$J_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e+r}(\lambda, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi$$

A radiosidade total J associado a todo espectro é:

$$J = \int_0^{\infty} J_\lambda(\lambda) \, d\lambda \longrightarrow J = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e+r}(\lambda, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi \, d\lambda$$

Se a superfície for refletora difusa e emissora difusa:

Intensidade total de radiosidade

$$J_\lambda(\lambda) = \pi I_{\lambda,e+r} \longrightarrow J = \pi I_{e+r}$$

17

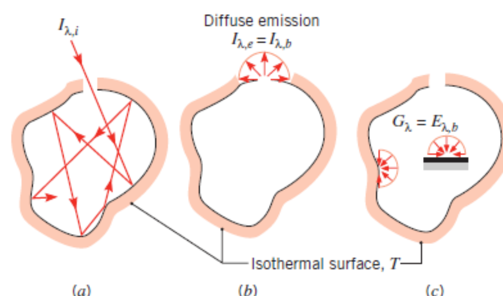
Corpo Negro

Definição:

O corpo negro é uma superfície ideal que tem as seguintes propriedades:
- Absorve toda a radiação incidente, independentemente de λ e da direção;
- Para uma T e λ dados, nenhuma superfície pode emitir mais energia que corpo negro;
- Embora E_b=f(T,λ), ela é independente da direção, ou seja, o corpo negro é um emissor difuso.

A melhor aproximação para um corpo negro é alcançada por uma cavidade cuja superfície interna encontra-se a uma temperatura uniforme:

(a) Absorção completa;
(b) Emissão difusa de uma abertura;
(c) Irradiação difusa das superfícies interiores;



Corpo Negro

A distribuição espectral da emissão de um corpo negro foi determinada por Planck:

$$I_{\lambda,b}(\lambda,T) = \frac{2hc_o^2}{\lambda^5[\exp(hc_o/\lambda k_B T) - 1]}$$

$c_o = 2.998 \times 10^8$ m/s
$h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s
$k_B = 1.381 \times 10^{-23}$ J/K

Como o corpo negro é um emissor difuso:

$$E_{\lambda,b}(\lambda,T) = \pi I_{\lambda,b}(\lambda,T) = \frac{C_1}{\lambda^5[\exp(C_2/\lambda T) - 1]}$$

$C_1 = 2\pi hc_o^2 = 3.742 \times 10^8 \text{ W}\cdot\mu\text{m}^4/\text{m}^2$

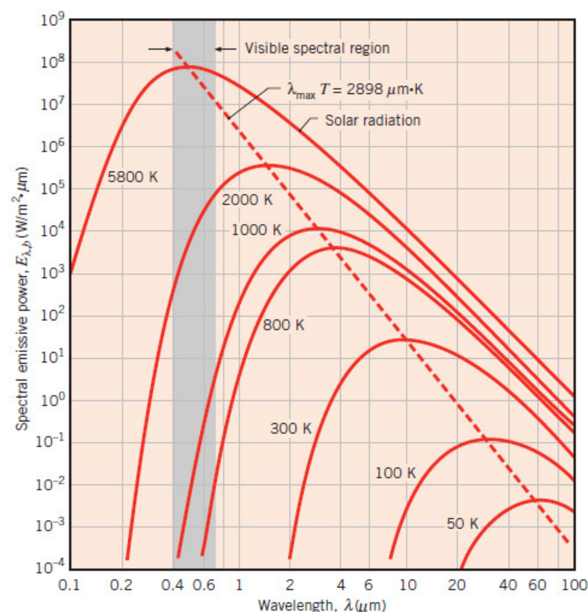
$C_2 = (hc_o/k_B) = 1.439 \times 10^4 \ \mu\text{m}\cdot\text{K}$

Lei do Deslocamento de Wien: a distribuição espectral do corpo negro tem um máximo e o comprimento de onda correspondente a esse máximo, λ_{max}, depende da temperatura. Essa dependência é obtida derivando $E_{\lambda,b}$ em relação a λ e igualando a zero:

$$\lambda_{max} T = C_3$$

$$C_3 = 2898 \ \mu\text{m}\cdot\text{K}$$

Corpo Negro



Corpo Negro

Lei de Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \int_0^\infty \frac{C_1}{\lambda^5[\exp(C_2/\lambda T) - 1]} d\lambda \longrightarrow E_b = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

Como a emissão é difusa:

$$I_b = \frac{E_b}{\pi}$$

Banda de emissão: emissão total de um corpo negro que se encontra em certo intervalo de comprimento de onda (banda). Para uma dada T e intervalo de 0 a λ, a fração da emissão total de um corpo negro é dada por:

$$F_{(0\to\lambda)} = \frac{\int_0^\lambda E_{\lambda,b}\, d\lambda}{\int_0^\infty E_{\lambda,b}\, d\lambda} = \frac{\int_0^\lambda E_{\lambda,b}\, d\lambda}{\sigma T^4} = \int_0^{\lambda T} \frac{E_{\lambda,b}}{\sigma T^5} d(\lambda T) = f(\lambda T)$$

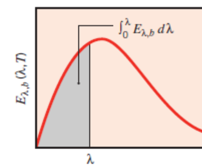


FIGURE 12.13 Radiation emission from a blackbody in the spectral band 0 to λ.

Corpo Negro

Solução: numérica tabelada

TABLE 12.2 Blackbody Radiation Functions

λT (μm · K)	$F_{(0\to\lambda)}$	$I_{\lambda,b}(\lambda,T)/\sigma T^5$ (μm · K · sr)$^{-1}$	$\frac{I_{\lambda,b}(\lambda,T)}{I_{\lambda,b}(\lambda_{max},T)}$
200	0.000000	0.375034×10^{-27}	0.000000
400	0.000000	0.490335×10^{-13}	0.000000
600	0.000000	0.104046×10^{-8}	0.000014
800	0.000016	0.991126×10^{-7}	0.001372
1,000	0.000321	0.118505×10^{-5}	0.016406
1,200	0.002134	0.523927×10^{-5}	0.072534
1,400	0.007790	0.134411×10^{-4}	0.186082
1,600	0.019718	0.249130	0.344904
1,800	0.039341	0.375568	0.519949
2,000	0.066728	0.493432	0.683123
2,200	0.100888	0.589649×10^{-4}	0.816329
2,400	0.140256	0.658866	0.912155
2,600	0.183120	0.701292	0.970891
2,800	0.227897	0.720239	0.997123
2,898	0.250108	0.722318×10^{-4}	1.000000

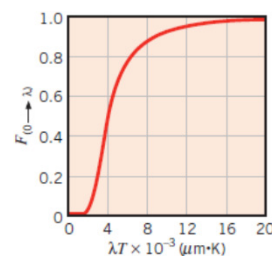


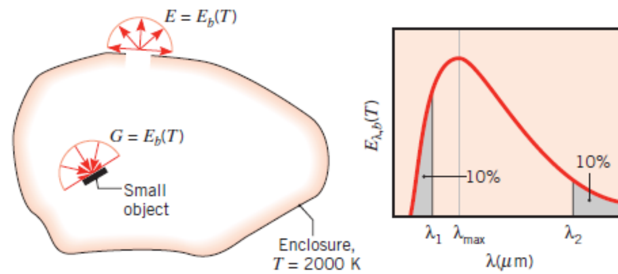
FIGURE 12.14 Fraction of the total blackbody emission in the spectral band from 0 to λ as a function of λT.

A fração da radiação emitida por um corpo negro entre dois comprimentos de onda quaisquer λ_1 e λ_2 é dado por:

$$F_{(\lambda_1\to\lambda_2)} = \frac{\int_0^{\lambda_2} E_{\lambda,b}\, d\lambda - \int_0^{\lambda_1} E_{\lambda,b}\, d\lambda}{\sigma T^4} = F_{(0\to\lambda_2)} - F_{(0\to\lambda_1)}$$

Corpo Negro

Exemplo 12.3:



Pede-se:

a) Poder emissivo de um pequeno orifício no invólucro
b) Comprimentos de onda inferior e superior nos quais 10% da radiação são concentrados
c) Poder espectral emissivo e comprimento de onda associado com emissão máxima
d) Irradiação sobre um pequeno objeto no interior no invólucro

Corpo Negro

Solução do Exemplo 12.3: